

FUNDAMENTOS CONCEPTUALES Y DIDÁCTICOS

LA PIEDRA NATURAL Y SU PRESENCIA EN EL PATRIMONIO HISTÓRICO

Natural Stone: Historical Heritage Presence

Rafael Fort González (*)

RESUMEN

La piedra natural utilizada en el patrimonio histórico sufre un importante deterioro por la acción continua del medio ambiente; diversos agentes de alteración interactúan durante el proceso. Los daños sobre la piedra son cuantiosos por la pérdida del volumen y acabado original de la piedra, con disminución del pulido, variaciones cromáticas, etc., que puede llegar a la ruina total del edificio, perdiendo su valor patrimonial. La observación de la piedra y los daños que presenta en un edificio es una práctica didáctica que mejora la capacidad de observación y de diagnóstico de las posibles causas que los han generado. Estos deterioros de la piedra monumental presentan patologías similares a las que se pueden observar en afloramientos naturales por lo que la observación de la piedra en los monumentos cobra gran interés como herramienta docente. Además, los materiales utilizados en el patrimonio monumental de una ciudad o pueblo son reflejo de la geología de su entorno lo que enriquece aún más la actividad didáctica al conectar el estudio del material en el edificio con el entorno geológico.

ABSTRACT

Natural stone used in Historical Heritage undergoes an important weathering due to the continuous action of the surrounding environment. Several decay agents may act in the weathering process. Stone damages, such as: stone volume loss, loss of the original finished of the stone, increase of roughness (decrease of original polished surfaces), chromatic changes, etc, are substantial. This fact might turn the building into ruins losing its heritage value. Observation of stone setting in a building and its damage is a teaching practice that increases the observation capacity and the ability of inferring the possible cause of stone damages. Monumental stone pathologies are similar to those found in natural outcrops. For this reason, it reaches a greater interest as a teaching tool. Besides, the materials used in the Monumental Heritage of a city, town or village, show the surrounding geology giving and added value to the didactic activity connecting the study of the material in the building with the Geology of the area.

Palabras claves: Deterioro, durabilidad, Piedra de construcción, patología, alteración

Keywords: Decay, durability, building stone, pathology, weathering.

INTRODUCCIÓN

La piedra natural se puede considerar un recurso geológico (georecurso) que ha sido utilizado por la humanidad para mejorar su calidad de vida. Las cuevas naturales y abrigos han sido utilizados para protegerse ante las condiciones adversas; el primer uso de la piedra natural para el patrimonio arquitectónico. Este uso se fue perfeccionando hasta empezar a utilizar los bloques de piedra para la construcción de viviendas, templos, etc.

El uso de la piedra natural para la construcción de monumentos y viviendas se inició hacia el año

8000 a.C. (Herrera, 1995). Pero realmente la piedra no solo se encuentra en el patrimonio construido, sino también en todo aquello que los primeros humanos realizaban para su uso cotidiano (armas defensivas, anzuelos, ornamentos, arte funerario, etc.). Los primeros utensilios líticos tienen una antigüedad de unos 2 millones de años, pero estos eran muy toscos, alcanzando una mayor perfección durante el Paleolítico inferior (100000 a.C.). En el Paleolítico superior son abundantes las tallas de figuras con referencia a la maternidad como la Venus Willendorf (25000-18000 a.C.) o la Venus Kostenki (23000 a.C.) talladas en calizas. Durante el

FE DE ERRATAS

El presente artículo debería haberse publicado en el número 16.3 de *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. Por un error en el proceso de maquetación, fue excluido del monográfico sobre recursos geológicos para el cual había sido solicitado. Pedimos disculpas por ello a su autor y a nuestros lectores. Para facilitar la vinculación temática con dicho monográfico, el presente artículo estará disponible en su versión electrónica tanto en nº 16.3 como en el presente 17.1 de ECT.

(*) Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM). Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid. rafort@geo.ucm.es



Fig. 1. Naveta des Tudons en Menorca.

Neolítico se construyeron las primeras estructuras en piedra, de carácter funerario, entre las que destacan las tumbas megalíticas de Newgrange, en Irlanda, con una antigüedad de 3200 a.C. o el Gran Menhir partido, en Francia, con una datación de 4500 a.C. Los dólmenes y menhires son construcciones muy abundantes en los países europeos, en España se resaltan los localizados en Antequera (Málaga) como son el Dolmen de Viera (4500 a.C.), El Megan (2500-2000 a.C.) y el Dolmen de El Romeral (1800 a.C.), pertenecientes estos últimos al Calcolítico. Otras construcciones de estas épocas son el yacimiento de Los Millares en Santa Fé de Mondújar (Almería) (2400 - 2000 a.C.) (Lucas, 1991). También se pueden citar como arquitectura prehistórica los tayalots, taulas y navetas de las Islas Baleares con dataciones de 850 a.C. (Fig. 1).

La piedra de construcción utilizada en el patrimonio es un buen recurso didáctico ya que a través de ella se pueden conocer los materiales geológicos existentes en una región (Pérez-Monserrat *et al*, 2008). Igualmente, en la piedra utilizada en los monumentos y en los edificios de las ciudades se pueden apreciar muchos fenómenos de alteración que se generan por la acción del medio ambiente urbano en que se encuentra. Estos procesos, en muchos casos, tienen su similitud con los procesos de deterioro en medios naturales. Por este motivo, ya en la década de los años ochenta se promovieron en el ámbito internacional y nacional lo que se denominan los itinerarios geológicos urbanos con fines educativos y de divulgación científica, una muy buena herramienta para la enseñanza de la geología



Fig. 2. Ruta Geomonumental en el patrimonio arquitectónico de Talamanca de Jarama, Madrid.

(Anguita *et al*, 1982; Slagle, 1982; Bach *et al*, 1986; Brusi y Bach, 1992; Soto y Morcillo, 2003).

Las Rutas Geomonumentales constituyen una novedosa metodología para abordar la difusión del patrimonio arquitectónico con una clara intencionalidad didáctica, permitiendo conocer de cerca los materiales geológicos, la relación que guardan con los edificios, su conservación y sus causas de alteración (Fort, 2005a; Pérez-Monserrat *et al*, 2006, 2007, 2008a y 2008b; Fort *et al*, 2008; Vázquez-Calvo, 2008) (Fig. 2).

TIPOS DE PIEDRA NATURAL

La piedra natural es un término genérico que se aplica en el ámbito de la construcción para aquella roca que se extrae de su yacimiento y tiene unas características técnicas que la permiten ser utilizada en obras de construcción.

– Dentro de este tipo de material se pueden diferenciar: la Piedra de construcción, o de cantería, y la Piedra o Roca ornamental. El primer término hace referencia a todo aquel material que puede ser incorporado en la estructura y fábrica del monumento, debido fundamentalmente a su resistencia mecánica; su elaboración es sencilla, de corte y labra. La Roca ornamental, aunque puede tener también esta cualidad, se valora más por sus posibilidades de decoración y de ornamentación. Debido a la belleza que presenta al ser tallada y pulida, se coloca en zonas nobles del monumento y en su parte escultórica. (Bustillo y Calvo, 2005; Fort, 2006)

– En función de su tamaño y dimensiones, los bloques obtenidos de la piedra de construcción se pueden denominar: sillares, sillarejos, mampuestos, losas, adoquines, etc. Los sillares son grandes bloques de piedra perfectamente labrados que adoptan forma de un paralelepípedo rectangular. El sillarejo es de peor labra y ajuste, con bloques más pequeños; sillar pequeño, labrado toscamente, de peor ajuste con las otras piezas y que no atraviesa todo el grosor del muro. Los mampuestos son piedras de pequeñas dimensiones, de forma más o menos irregular y nada o apenas desbastadas, que pueden ser fácilmente manejadas por un solo hombre; su peso y volumen coinciden con el peso y volumen de los sillarejos (Fig. 3).



Fig. 3. Muro de mampostería de granito con colonización de líquenes.

– Un aspecto importante es el acabado final que se le da a la superficie de la piedra, ya que esto controla muchas veces su resistencia a los procesos de deterioro, o por el contrario puede acelerarlos. Aunque se puede cambiar el aspecto superficial de la piedra natural, no todas permiten los mismos acabados, e incluso estos acabados tienen que ser acordes: al tipo de piedra, para resaltar sus propiedades; al uso que se le va a dar y a la ubicación en el edificio. Los acabados varían según la herramienta utilizada y el tipo de piedra (Azconegui y Castellanos, 1993). Los tipos de acabados más normales en la piedra natural son:

Esculpido o picado. Consiste en labrar la superficie de la pieza mediante impactos con herramientas específicas (cinceles, ñetas, bujardas, etc.) para darle texturas diferentes. Uno de los acabados más extendidos es el denominado abujardado que proporciona una superficie rugosa y homogénea, con pequeños cráteres uniformemente repartidos en la superficie del sillar que son generadas por la bujarda, y el apiconado, que produce muescas e incisiones alargadas que proporcionan un aspecto tosco a la superficie de la piedra. Estos acabados son los más utilizados en el patrimonio monumental (Fig. 4).

Cortado o serrado. En el cortado, la superficie presenta marcas de surcos y ondulaciones en direcciones curvas y concéntricas. El serrado deja una superficie más lisa pero rugosa al tacto. En ambos casos, la piedra queda con la huella de las herramientas utilizadas (pico o trinchante).

Pulido. Consigue una superficie lisa, plana y brillante, sin ningún tipo de raya o arañazo visible. El pulido se consigue pasando la superficie por diferentes productos abrasivos, de granulometrías cada vez más fina, que dan a la piedra ese aspecto brillante. El apomazado es similar, aunque no se alcanza el grado de pulido máximo; se elimina cualquier rugosidad de la superficie que queda plana, mate y sin marcas.

Flameado. Consiste en aplicar altas temperaturas a la superficie de la piedra (2500 °C) que generan una fusión de la superficie de los minerales lo que hace que sea un acabado muy resistente a los agentes de deterioro. Suelen dar una superficie con cierto relieve, rugosa, algo craterizada y vítreo.



Fig. 4. Sillar de caliza con acabado de abujardado y apiconado (foto de E. Pérez Monserrat).

EL USO DE LA PIEDRA EN EL PATRIMONIO

España es un país en donde la cultura de la construcción de la piedra está muy extendida. Las características geológicas de la Península Ibérica permiten tener una gran variedad de tipos petrológicos con muy buenas calidades para ser utilizados en el patrimonio construido; diferentes tipos de granitos, calizas, areniscas, mármoles, pizarras, etc. Aunque algunas de las variedades han tenido un uso local o regional, constituyendo lo que se denomina piedra tradicional de construcción, muchas de ellas tuvieron y tienen un reconocimiento de su calidad que ha permitido su exportación a otras regiones e incluso a otros países (Regueiro y Ouereda, 1994; García de los Ríos y Baéz, 2002).

El uso de la piedra en el patrimonio construido estaba motivado por ser un recurso abundante, disponible en la superficie del terreno y próximo a la zona de utilización. Su extracción era fácil y su elaboración y colocación sencilla y posible con los medios con los que se contaba. Además, este recurso era muy valorado por que se estimaba que tenía una gran durabilidad, eran materiales eternos; tenía mucha resistencia, por lo que eran muy adecuados para elementos defensivos; mostraba una grandiosidad y, sobre todo, por la propia belleza de estos materiales. Pero no siempre se podía utilizar la piedra más adecuada, ya que la selección de la piedra para la construcción estaba definida por la disponibilidad y abastecimiento suficiente de piedra en la cercanía de la obra. Por otro lado, tenía que ser un material fácil de trabajar, para que su extracción y, sobre todo, la labra fuesen sencillas en función de las herramientas disponibles en cada época.

Esto ha hecho que haya sido muy apreciada por muchas civilizaciones para construir sus edificaciones militares de tipo defensivas (castillos, murallas, etc.), religiosas (catedrales, monasterios, iglesias, etc.), obras de ingeniería (presas, puentes, acueductos, etc.), urbanísticas (calzadas, edificios, fuentes, etc.). Por ello, la piedra de construcción es un recurso muy valorado y es el eje de la economía de muchos pueblos en que existe una tradición importante de la cantería.

El uso de la piedra en el patrimonio histórico tiene un componente muy local, debido a la dificultad de traslado de grandes bloques a grandes distancias, y, sobre todo, si no se cuenta con vías de transporte apropiadas. Por ello, es frecuente que muchas ciudades estén construidas con el mismo tipo de piedra procedente de su entorno, y su variedad en los monumentos depende de la variedad geológica del entorno en que se enclava. Un caso característico es el uso de la Piedra de Marés en las Islas Baleares, o la piedra de Arucas en las Islas Canarias (Fig. 5).

Se puede definir como piedra tradicional los materiales utilizados de forma habitual y continuada a lo largo de la historia evolutiva de la construcción de una localidad. Las piedras tradicionales configuran el color y textura de las ciudades, marcando la percepción de su estética. Así, se pueden



Fig. 5. Cantera de piedra Marés en Ciutadella (Menorca).

destacar numerosas piedras tradicionales de construcción como son: Piedra de Boñar (León), Hontoria (Burgos), Campaspero (Valladolid), Calatorao (Zaragoza), etc.

La época romana fue muy fructífera en construcciones civiles y obligó a la apertura de diferentes canteras, muchas de ellas todavía persisten y extraen material para obras actuales. Se pueden citar las canteras de mármol de Macael (Almería); los mármoles de Alconera y Clarija (Badajoz); la caliza de Garraf y las areniscas de Montjuich (Barcelona); las calizas de Sagunto y de Moncada (Valencia); el mármol de Buñol (Valencia); las calizas de Santa Tecla, Tortosa, y la piedra del Médol en Tarragona; los conglomerados de Espejón (Soria); los mármoles de Cabra (Córdoba); las dolomías de Estepa y Gileña en Sevilla; las calizas de Marquina y de Ereño en Vizcaya; etc.

En la Edad Media, con la construcción de las catedrales, murallas, castillos y monasterios, se siguieron utilizando canteras romanas, pero también se abrieron otras nuevas. Las piedras tradicionales utilizadas en esta época son muy numerosas y pertenecen a todos los periodos geológicos. Se pueden destacar: las calizas Griotte y de Montaña del Carbonífero de Asturias; las piedras del Cretácico de Sepúlveda, Berny y del Parral (Segovia), Silos y Hontoria (Burgos), Piedramuelle (Asturias), Redueña (Madrid) Tamajón (Guadalajara) y Boñar (León), o la piedra del Oligoceno de Villamayor (Salamanca) y la Floresta o Vinaixa (Lérida). Del Mioceno se ha extraído muchos tipos de piedras utilizadas en el patrimonio arquitectónico, destacando la piedra de Campaspero (Valladolid), Piedra de



Fig. 6. Sillares de caliza y granitos en Santa María de Nieva (Segovia).

Uncastillo (Zaragoza), Santannyí y Marés (Islas Baleares), Piedra de Novelda (Alicante), Piedra de Espera (Cádiz), Piedra de Santa Pudía (Granada), Caliza de Colmenar (Madrid), etc. (Regueiro y Quereda, 1994; Esbert *et al.* 1997; Fort, 2006).

Estas piedras siguen siendo utilizadas para las construcciones actuales, pero desde finales del siglo XIX se están incorporando otras piedras naturales procedentes de otras regiones y países dado que los medios de comercialización y las vías de transporte han mejorado sustancialmente. Igualmente, en los trabajos de restauración se incorporan otros materiales que pueden generar diferentes daños por incompatibilidad estéticas o petrofísicas con la piedra original (Fort, 2006) (Fig. 6).

DETERIORO DE LA PIEDRA NATURAL EN EL PATRIMONIO CONSTRUIDO

Aunque en la antigüedad se consideraba a la piedra como un material de construcción eterno, actualmente se sabe que su durabilidad y su vida media se han reducido sustancialmente al estar sometidos a ambientes agresivos, principalmente urbanos y costeros.

– A partir del inicio del siglo XX, la tendencia en el deterioro de la piedra con que se han construido los monumentos es de aumentar de una forma exponencial, debido fundamentalmente a la actividad industrial, con consumos elevados de carbón y otras fuentes energéticas que aumentan la contaminación ambiental, así como al aumento de población en las ciudades. Esto genera una presión degradativa del entorno que afecta a la

pedra de los monumentos y acelera su alteración; de tal forma que monumentos milenarios han empezado a sufrir su degradación en este último siglo (Fort, 2007).

– La degradación de los monumentos esta muy directamente ligada a la relación de las características petrológicas de las rocas y el medio ambiente en que se encuentra dentro del monumento. Por ello, las causas de degradación pueden ser divididas en factores intrínsecos, propios del material de construcción utilizado, como es su composición mineralógica, propiedades petrológicas y petrofísicas; factores extrínsecos, relacionados con el ambiente y entorno en que se encuentra el monumento, y factores constructivos, dependientes de las características constructivas del edificio, entre los que se encuentra: la selección de material, la incompatibilidad de los materiales, la mala disposición de la piedra en el edificio, las tensiones generadas entre la piedra y el edificio, las modificaciones de uso, la inestabilidad del terreno y los riesgos geológicos. Un cuarto factor es el antrópico o humano, producto fundamental de falta de educación cultural y medioambiental de la sociedad, que incluye: el vandalismo, la ausencia de mantenimiento, las restauraciones incorrectas, los conflictos bélicos, etc., y que incide directamente en los otros factores. En la figura 7, se muestra como interactúan estos factores en la degradación del patrimonio arquitectónico. El tiempo también incide, ya que cuanto más tiempo este sometido a estas condiciones de agresividad mayor es la rapidez con que se deteriora el material.

– Las características petrológicas de la piedra utilizada en construcción inciden muy directamente en su capacidad de resistencia al deterioro. Las piedras están constituidas por una asociación de minerales que han cristalizado en el interior de la tierra (alta temperatura y alta presión) y que corresponden a las rocas plutónicas, como son los granitos, y a rocas metamórficas como pizarras, mármoles o cuarcitas. También existen rocas que se han generado a

menor profundidad, cercanas a la superficie de la Tierra, como son las rocas sedimentarias o exógenas (areniscas, calizas, dolomías, etc.). Estos minerales son inestables cuando son sacados de las condiciones de génesis y se alteran de forma natural, transformándose estas fases minerales en otras más estables (neoformación de minerales) en las nuevas condiciones de menor presión y temperatura en que se encuentran. Estas transformaciones las sufren antes aquellos minerales que han cristalizado antes en el magma o aquellos que se han formado en condiciones muy diferentes a las existentes en la actualidad, es decir, se realizan en orden inverso al de la cristalización o formación de los minerales. Los minerales existentes en una roca plutónica se alteraran en el orden inverso al de su cristalización, determinado por la serie de Bowen, y que se denomina serie de Goldich. Pero además de la composición mineralógica de la roca también va a influir la textura de la roca y su estructura. Las rocas de textura más gruesa tenderán a alterarse más rápidamente que las de grano más fino.

También las propiedades petrofísicas, principalmente la porosidad y la distribución de tamaños de los poros, inciden directamente en la degradación de las piedras. La porosidad de la roca va a controlar los otros parámetros petrofísicos como son la superficie específica del material, el comportamiento hídrico, la resistencia mecánica, etc. Las piedras con alta porosidad y de tamaño de poros más pequeño son más sensibles a los efectos de alteración por acción del agua y también a los procesos de cristalización de agua y de sales en el sistema poroso de la roca. Hay que indicar que durante el proceso de alteración de estos materiales, la porosidad de la roca tiende a aumentar y, por lo tanto, la entrada y la acción de los agentes degradantes hacen que el deterioro de los materiales sea progresivo.

Los procesos de alteración de las rocas existentes en afloramientos son los mismos que los que sufren estos materiales una vez puesto en una edificación, con la salvedad que desde que se colocan estos materiales han sufrido ya unos daños durante su proceso de extracción de las canteras, por acción de talla y labrado. Todo el proceso de deterioro se acelera en ambientes agresivos como son los ambientes urbanos.

Este deterioro puede verse en los monumentos y edificios de nuestras ciudades, en los que se aprecia una pérdida de la superficie original de la piedra. La tasa de pérdida puede alcanzar valores de varios mm/año, dependiendo del material y del agente de deterioro. La progresión del deterioro puede provocar la ruina del edificio-monumento.

Los productos de alteración son similares a las morfologías que se pueden observar en los propios afloramientos de los materiales en el campo. Además, permite una identificación de las características petrológicas a nivel macroscópico, aunque tiene como inconveniente perder el contexto geológico en que se encuentran estos materiales de forma natural.

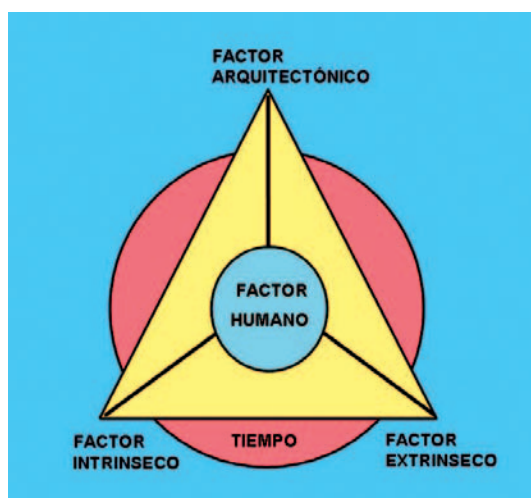


Fig. 7. Factores que inciden en el deterioro de la piedra natural del Patrimonio histórico.

Daños en la piedra natural

Todos estos factores generan una serie de daños en la superficie y estructura de los materiales de construcción. Hay que indicar que nunca se pueden considerar como una patología o daño en la piedra características propias de la piedra (como la presencia de estratificación, cavernas, estilolitos, etc.). Únicamente se pueden considerar con esta calificación si son daños que se han generado después de su colocación en la obra y debidos a los agentes de deterioro. Las patologías más frecuentes que se pueden ver en el patrimonio arquitectónico realizado en piedra son muy abundantes (Martín, 1990; Esbert *et al.*, 1997; Fitzner y Heinrichs, 2004) y pueden clasificarse en cuatro grandes grupos:

Depósitos. Resultan de la acumulación o neoformación de minerales en la superficie de la piedra.

Pueden generar un cambio en el color natural de la piedra (alteración cromática o decoloración), dando lugar a tinciones o moteados por la presencia de minerales en la roca que se pueden oxidar o de elementos externos (clavos, rejas, etc.). Las pátinas naturales son cambios en las características superficiales de la piedra por una acción de envejecimiento natural, que afecta a todo el conjunto de la superficie de la piedra y que son debidas a múltiples factores como son: biológicos, físicoquímicos, minerales, etc. (Fig. 8). Cuando estos cambios son inducidos artificialmente se usa preferentemente el término “pátina artificial” (Álvarez de Buergo y Vázquez-Calvo, 2007). No se pueden considerar como un daño las pátinas artificiales o aplicadas para la protección de la piedra, a no ser que estas hayan generado daños posteriores a la superficie de la piedra.

La deposición en la superficie de la piedra de polvo y partículas de combustión generadas por la contaminación atmosférica generan un importante proceso de ensuciamiento y enmugrecimiento de la superficie de los materiales de las fachadas de los edificios.

La presencia de eflorescencias salinas y costras de sulfatación son depósitos cristalinos de sales que se generan en la superficie de la piedra. Las eflorescencias son películas delgadas de aspecto polvoriento y poco compacto. Cuando los depósi-



Fig. 8. Acanaladuras y pátina en granitos del Palacio de Ríofrio (Segovia).



Fig. 9. Desplacado y subeflorescencias en sillares de granito.

tos de sales se localizan en el interior de la piedra, y no en su superficie, se denominan subeflorescencias (Fig. 9). Las costras tienen un grosor mayor, están ligeramente endurecidas y constituidas por sales y/o partículas (silicatos, carbonatos, metales, etc.) de procedencia diversa, como es la contaminación atmosférica que suele generar las denominadas costras negras. Estas costras negras se generan principalmente en materiales calcáreos, aunque también son frecuentes en edificios de granito debido a la disolución de los morteros de cal de la juntas de los sillares o de los minerales cálcicos (plagioclasas) (Fig. 10).

Los procesos de disolución de materiales y su posterior precipitación dan lugar a las denominadas concreciones cuando la precipitación de las nuevas fases minerales se depositan en la superficie de la piedra; se denominan costras blancas cuando son concreciones de carbonatos o de sales de tonos blanquecinos procedentes de la disolución de la propia piedra caliza o los morteros de juntas. A veces pueden generar estalagmitas o estalagmitas. Si, por el contrario, estas fases minerales penetran en el interior de la piedra generan un proceso de consolidación de la piedra y darían lugar a lo que se denomina incrus-



Fig. 10. Costra negra en granito del Palacio Real de Madrid.

taciones. Las concreciones se diferencian de las eflorescencias salinas por una mayor dureza de depósito.

La colonización de microorganismos (bacterias, algas, hongos, líquenes, etc.) pueden dar la las denominadas pátinas biológicas (biofilm).

Pérdida de material. Son daños que aparecen en la piedra por acciones fisicoquímicas o mecánicas que producen una pérdida de material, principalmente por pérdida de cohesión entre los constituyentes de la roca.

Disgregación es la pérdida de cohesión de los componentes mineralógicos de la piedra (descohesión) que está caracterizado por el desprendimiento de granos o cristales de la superficie de la piedra ante procesos mecánicos o fisicoquímicos de alteración. Se denomina arenización cuando la descohesión afecta a tamaño de cristales o granos de un tamaño próximo a la arena (< 2 mm), cuando afecta a tamaño de polvo ($< 0,06$ mm) se denomina pulverización. La arenización es característica de los granitos por procesos de hidrólisis de los feldespatos para dar minerales arcillosos, que son eliminados con facilidad, quedando sueltos los granos de cuarzo; la pulverización es característica de areniscas y de rocas carbonáticas de tamaño de grano fino. Esta disgregación puede ser diferencial, marcando las diferencias de heterogeneidad en la composición o estructura del material, lo que evidencia los motivos de textura o estructura originales de la piedra. Así, si la pérdida de material es principalmente en forma lineal y con orientación paralela entre sí, se originan las denominadas estrías (Fig. 11), pero si son de gran abertura se denominan acanaladuras (Fig. 8). Cuando la pérdida no presenta orientación paralela o subparalela se denomina rozadura. El origen de las estrías y acanaladuras está muy relacionado con la cementación diferencial de las piedras, que dan lugar a laminaciones y estratificaciones, cuya disolución diferencial da dichas morfologías. Por el contrario, las rozaduras tienen un componente mecánico importante en su formación y se generan por desgaste de la superficie de la piedra por acción de elementos extraños.

Si la morfología de la pérdida de material es no lineal, se forman los picados, que son pequeñas

cavidades de un tamaño de milímetros que no suelen estar interconectados entre sí. Si son de mayor tamaño, de varios centímetros, se denominan cavernas, que no suelen estar interconectadas. Las alveolizaciones por el contrario están interconectadas entre sí y no tienen una distribución uniforme; pueden estar originadas por la disolución o hidrólisis de sus minerales y con procesos de arenización o pulverización (Fig. 12). La alveolización esta asociada a fenómenos de cristalización de sales y/o por la acción erosiva del viento. Es relativamente común en calizas, en areniscas con cemento carbonatado o en rocas porosas en general.

Deformaciones. Alteraciones que afectan a todo o parte del espesor del material y que se manifiestan, sobre todo, en elementos en forma de losa o lápida. Se forman por hinchamiento de la parte exterior de la pieza que tiende a abombarse y a romperse por tensión con desprendimiento de una lámina que puede ser de varios decímetros cuadrados. Cuando esto afecta a toda la superficie de la piedra, con pequeñas protuberancias o abombamientos, se generan las ampollas. Muchas veces están relacionadas con las costras negras y con los procesos de hidratación de fases salinas.

Combamiento o alabeamiento. La superficie de la pieza tiende a curvarse, perdiendo su planicidad. Se genera tanto por acción de la humedad como por acción térmica producida por la insolación de la pieza. Es frecuente en las placas de mármol de grandes dimensiones.

Rupturas. Esta patología implica la rotura de la piedra. Algunas roturas están relacionadas con las



Fig. 11. Estrías en sillares de caliza en Tortosa (Tarragona).



Fig. 12. Alveolización y arenización en sillares de la Catedral de Sigüenza (Guadalajara).



Fig. 13. Fisuras por incompatibilidad de materiales en sillar de San Sebastian (Bilbao).

características propias de la piedra como es la pizarrosidad, las diaclasas, la esquistosidad, los estilolitos, las vénulas, etc. Pueden diferenciarse varios tipos de rupturas según afecten a la estructura propia de la roca. Las rupturas paralelas a la superficie del sillar o pieza de labra, se denominan desplazado, descamación, etc.; si se disponen sin orientación definida, o perpendiculares a la superficie de la piedra, se denominan fracturas. El origen de estas rupturas es variado pero siempre implica unos esfuerzos mecánicos que pueden ser generados por: la carga diferencial, acciones de cristalización de sales, heladicidad, actividad biológica, hinchamiento de arcillas, oxidación de elementos metálicos, etc. (Fig. 13).

Se definen como fisuras: las rupturas o discontinuidades de la piedra sin que se genere una separación importante entre las partes de la piedra afectada. Si existe una abertura o separación de las partes afectadas, si están totalmente separadas, se denomina fragmentación, e incluso puede dar lugar a la pérdida del material fragmentado.

Las rupturas paralelas a la superficie de la piedra dan lugar a los desplazados (Fig. 9). Los desplazamientos son fracturas que se producen de forma paralela a la superficie, dando lugar a la formación de placas de grosor variable, próximas al centímetro. No suelen tener relación con la estructura de la piedra y se generan por causas diversas como son: cristalización de sales en zonas de fuerte desecación, zonas aireadas o expuestas a la radiación solar, actividad biológica, cambios hídricos, etc. Si estas placas tienen un grosor más pequeño (milímetros) se generan las descamaciones e, incluso, si es más pequeño, se denomina microescamación.

Causas del deterioro

– Las causas que generan estos daños en los materiales son muy variadas, como ya hemos indicado, y no se deben a la acción aislada de un único agente, sino que participan en muchas ocasiones un conjunto de agentes de deterioro que interaccionan.

– Entre los factores que tienden a degradar los materiales de construcción del patrimonio hay que destacar los diferentes agentes de deterioro. En la Figura 14 se muestra que el patrimonio está afectado, principalmente, por cuatro agentes de deterioro que son el agua, la acción biológica, la cristalización de sales y la contaminación atmosférica; los más perniciosos para la conservación de la piedra de los monumentos.

La presencia de humedades altas en la piedra hace disminuir su calidad mecánica; la hace propensa a ser colonizada por microorganismos; facilita la degradación química de sus componentes, al favorecer los procesos de hidrólisis, hidratación, oxidación, etc. y su degradación física, por los procesos de cristalización del hielo (Fort, 2005b). Cuanto mayor sea la cantidad de agua que absorbe

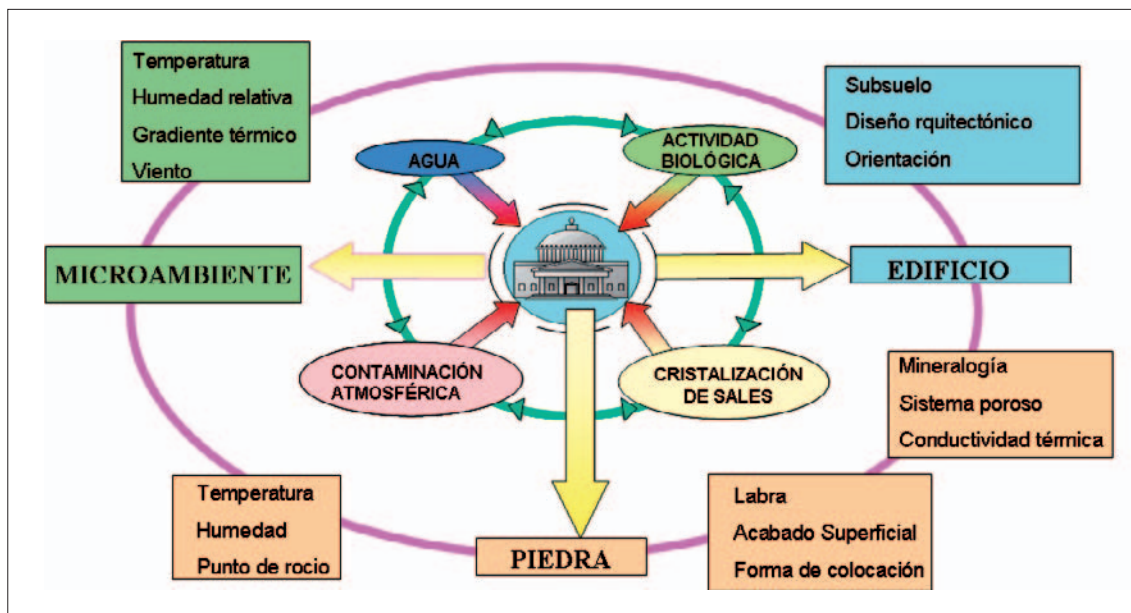


Fig. 14. Agentes de deterioro y sus relaciones con las condiciones medioambientales.

la piedra y cuanto mayor la rapidez en que absorbe esta agua, mayor va a ser la degradación de la piedra. Pero también va a influir el tiempo que tarda en evaporarse el agua del interior de la roca y la forma de realizarse este proceso de evaporación. Estos materiales sometidos a los procesos cíclicos de humedad - sequedad sufren importantes deterioros. Por el contrario, las piedras con una gran capacidad de absorción de agua y escasa capacidad de evaporación, son materiales potenciales a sufrir procesos de degradación por acción del hielo-deshielo, si las temperaturas externas son bajas. Por lo tanto también en estos procesos influyen las oscilaciones térmicas por insolación que junto por la acción del viento permiten el secado del material.

La presencia de humedad también favorecen la colonización de microorganismos que van a generar importantes daños en la piedra. Los grupos sistemáticos que son propicios para el deterioro de la piedra son: bacterias, algas, hongos, líquenes, musgos y plantas superiores. Las bacterias que inciden en mayor medida en la degradación de la piedra son las bacterias nitrificantes, que transforman la forma reducida del nitrógeno, el amoníaco (NH_3^-), en sus formas oxidadas, nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-). Otros grupos de bacterias son las que actúan en el proceso de oxidación del azufre, tanto elemental como procedente de sulfuros, dando lugar a SO_4^{2-} , que al reaccionar con los iones Ca^{+2} , presentes en el medio, dan lugar al yeso.

Las sales existentes en los materiales pétreos pueden cristalizar en su superficie formando eflorescencias salinas, o bien en el interior de su sistema poroso dando lugar a criptoeflorescencias. Los daños generados son debidos a la actuación de la presión de cristalización, presión de hidratación y dilatación térmica de los minerales salinos en el sistema poroso de la roca, dando lugar a la ruptura de su estructura interna. Estas presiones son más altas en los tamaños de poros más pequeños (inferiores a 5 μm). Como ejemplo, la presión de cristalización de NaCl (halita) puede superar los 2000 Kg/cm^2 . Las rocas con alta porosidad, tamaño de poros pequeño y baja resistencia mecánica son las más susceptibles de deteriorarse (Benavente, 2007).

Las fluctuaciones de la temperatura y de la humedad son muy corrientes en los edificios, y a lo largo del día puede haber varios ciclos de hidratación-deshidratación de las sales por lo que a medio-largo plazo se produce la fatiga del material y tiende a deteriorarse.

Los daños que generan los contaminantes atmosféricos sobre los materiales pétreos de nuestros edificios son muy variados pero los más importantes se generan en la superficie de la piedra por ensuciamiento, decoloración, tinciones, formación de eflorescencias salinas y, sobre todo, costras negras, generación de ampollas, disoluciones, pérdida de cohesión, etc. Estos contaminantes atmosféricos pueden encontrarse en forma gaseosa, sólida (partículas en suspensión) o como aerosoles. Entre los principales contaminantes atmosféricos que pueden afectar a la durabilidad del material pétreo se en-

cuentran: dióxido de azufre, óxidos de carbono, dióxido y monóxido de nitrógeno, ozono, partículas en suspensión, etc. Todos estos elementos pueden reaccionar entre sí, formando nuevos contaminantes, denominados secundarios. Además, pueden reaccionar con el agua aumentando su acidez y dando lugar a la lluvia ácida, facilitando los procesos de degradación de los materiales pétreos por mecanismos de disolución y de hidrólisis (Fort, 2007). Los contaminantes se reparten alrededor del monumento según definen las leyes de mecánica de fluidos y de acuerdo con su situación urbanística (orientación, dimensiones de calles, altura de edificios, etc.), la dirección y velocidad del viento, el reparto de temperaturas y oscilaciones térmicas, la humedad y lluvia ácida, etc.; son los que determinan el medio ambiente del monumento. Por lo tanto, el microclima y la contaminación atmosférica interactúan conjuntamente degradando el patrimonio.

CONCLUSIÓN

En definitiva, la piedra natural es un georecurso que ha sido ampliamente utilizado en la antigüedad formando parte del patrimonio cultural. Es un recurso muy bien valorado por lo que se ha mantenido su uso hasta la actualidad para la elaboración de diferentes productos en el ámbito de la construcción, pero principalmente para pavimentación y fachadas de muchos de edificios actuales y para su parte escultórica y ornamental. A pesar de su muy buena resistencia a los procesos de deterioro, estos elementos tienden a sufrir daños que son indicadores de agentes de deterioro en algunos casos específicos y en otros interactuando diversos agentes a la vez. Estos deterioros de la piedra monumental presentan patologías similares a las que se pueden observar en afloramientos naturales, pero con una mayor incidencia en su deterioro por la acción antrópica que acelera el proceso y da otras patologías específicas, como la presencia de costras negras. La presencia de la piedra natural, con sus diferentes características petrológicas, su disposición en los edificios y los procesos de deterioro que sufren son importantes recursos didácticos ya que permiten acercar al alumno a estos materiales y permiten a través de itinerarios o rutas mostrarles los daños que generan distintos ambientes de deterioro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Programa Maternas financiado por la Comunidad de Madrid (0505/MAT/0094) y al Programa TCP de CONSO-LIDER-INGENIO 2007, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (CSD2007-0058).

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez de Buergo M. y Vázquez-Calvo M.C. (2007). Pátinas, historia de una tecnología para la protección. En: *Ciencia, Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo*. Pérez-Monserrat, E.M.,

- Gómez-Heras, M., Álvarez de Buergo, M., Fort, R. (eds). Dpto. Publicaciones Universidad Popular José Hierro, San Sebastián de los Reyes. 23-28.
- Anguita, F., San Miguel, M. y Sánchez, J.R. (1982). Un itinerario geológico urbano en las inmediaciones del Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid. En: *II Simposio Nacional sobre la enseñanza de la Geología*, Gijón, 165-175.
- Azconegui, F. y Castellanos, A. (1999). *Guía práctica de la cantería*. Editorial de los Oficios, León. 3ª edición.
- Bach, J., Brusi, D. y Obrador, A. (1986). Pautas para la realización de itinerarios urbanos. En: *IV Simposio Nacional sobre la enseñanza de la Geología*, Vitoria-Gasteiz, 263-273.
- Benavente, D. (2007). La cristalización de sales como mecanismo de deterioro en rocas usadas en el patrimonio arquitectónico. En: *Ciencia, Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo*. Pérez-Monserrat, E.M., Gómez-Heras, M., Álvarez de Buergo, M., Fort, R. (eds). Dpto. Publicaciones Universidad Popular José Hierro, San Sebastián de los Reyes. 33-40.
- Brusi, D. y Bach, J. (1992). Posibilidades didácticas de las rocas de construcción. Las rocas ornamentales. Actas del VII Simposio sobre Enseñanza de la Geología. Santiago de Compostela. 269-292.
- Bustillo, M. y Calvo Sorando, J.P. (2005). *Materiales de construcción*. Fueyo Editores. Madrid.
- Esbert, R., Ordaz, J., Alonso, F.J., Montoto, M., González Limón, T. y Álvarez de Buergo, M. (1997). *Manual de diagnóstico y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*. Colegio de aparejadores y arquitectos técnicos de Barcelona.
- Fitzner, B. y Heinrichs, K. (2004). Photo atlas of weathering forms on stone monuments. <http://www.stone.rwth-aachen.de>. Geological Institute, RWTH Aachen University. Fort, R. (2005a). Rutas geomonumentales de la Comunidad de Madrid <http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/patrimonio/rutas/geomonumentales/default.asp>. Fundación Madrid para el Conocimiento
- Fort, R. (2005b). Acción del medioambiente en el deterioro de la piedra natural. *Roc maquina*, 92-93, 16-20.
- Fort, R. (2006). Utilización de la Piedra Natural en Restauración. En: *Utilización de rocas y minerales industriales*. M.A. García del Cura y J.C. Cañaveras (ed.). Ed. Universidad de Alicante. Seminario de la Sociedad Española de Mineralogía, 2, 155-182.
- Fort, R. (2007). La contaminación atmosférica en el deterioro del patrimonio monumental: Medidas de prevención. En: *Ciencia, Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo*. Pérez-Monserrat, E.M., Gómez-Heras, M., Álvarez de Buergo, M., Fort, R. (eds). Dpto. Publicaciones Universidad Popular José Hierro, San Sebastián de los Reyes. 57-70.
- Fort, R., Pérez Monserrat, E. M., Varas, M. J., Álvarez de Buergo, M. (2008). Ruta Geomonumental La piedra tradicional utilizada en la construcción del Patrimonio Arquitectónico de Madrid. En: *Comunicación social de la ciencia*. CSIC. Talleres. CD- Rom, 1-11. ISBN: 978-84-00-08645-9.
- García de los Ríos J. I. y Báez J.M (2002). *La piedra en Castilla y León*. Junta de Castilla y León, 2ª edición. 345 pp.
- Herrera, J. (1995). La roca monumental en la Historia. En: *Manual de rocas ornamentales* Ed. C. López Jimeno. Entorno Gráfico, S.L. Madrid. 41-66.
- Lucas, R. (1991). El Arte Calcolítico. *Cuadernos de Arte Español*, 81 pp.
- Pérez-Monserrat, E.M., Varas, M.J., Gómez-Heras, M., Álvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2006). Rutas Geomonumentales: una herramienta para la difusión del patrimonio arquitectónico. En: *VIII Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*, La Dimensión Social del Patrimonio, Salta, Argentina, 215-226.
- Pérez-Monserrat, E.M., Fort, R., Álvarez de Buergo, M. y Varas, M.J. (2007). Rutas Geomonumentales: estrategia de difusión científica para la conservación del patrimonio arquitectónico. En: *IV Congreso Comunicación Social de la Ciencia. Cultura Científica y Cultura Democrática*. CSIC, Madrid.
- Pérez-Monserrat, E.M., Benito, F., Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Varas, M.J. (2008a). Las rutas geomonumentales como experiencia educativa para la difusión del Patrimonio Geológico y Arquitectónico de la Sierra de Ayllón, Segovia. Actas XV Simposio sobre Enseñanza de la Geología. Ed. A. Calonge, L. Rebollo, MD. López-Carillo, A. Rodrigo e I. Rabano. Ed. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. *Cuadernos del Museo Geominero*, 11, 351-363
- Pérez-Monserrat, E.M., Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Varas, M.J. (2008b). Rutas Geomonumentales: La Geología para la enseñanza y difusión del patrimonio arquitectónico. *Tierra y Tecnología* 33, 39-46
- Regueiro, M. y Ouereda Rodríguez Navarro, J. M. (1994). La Piedra de Cantería en España. *Bol. Geol. y Minero*, 105-4, 376-388.
- Slagle, E.S. (1982). *A Tour Guide to Building Stones of New Orleans*. New Orleans Geol. Society, 68 p.
- Soto, P.J. y Morcillo, J.G. (2003). Ruta geológica urbana por el Madrid de los Austrias. En: <http://www.ucm.es/info/diciex/programas/rutageologica/index.html>. Universidad Complutense de Madrid
- Vázquez-Calvo C., Pérez-Monserrat E.M., Varas M.J., Álvarez de Buergo, M., Fort R. (2008). La geología en la conservación del patrimonio arquitectónico: otra forma de difundir el patrimonio geológico. *Geo-Temas* 10, 1339-1342■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 29 de noviembre de 2008 y aceptado definitivamente para su publicación el 11 de mayo de 2009